

С. Г. ЛОМОВ

## ТОПОЛОГИЯ ЭКРАННЫХ ТОКОВ В СИЛОВЫХ 3-ФАЗНЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ

Рассмотрены физические причины токов в экранах силовых 3-фазных кабельных линий при двухстороннем заземлении экранов. На основе теории электромагнитного поля предложена уточненная методика расчета «продольных» токов в экранах кабельных линий плоскостной укладки и проложенной «треугольником».

**Ключевые слова:** силовая 3-фазная кабельная линия, кабельная линия плоскостной укладки, кабельная линия проложенная «треугольником», электромагнитный экран, «продольные» токи.

С. Г. ЛОМОВ

## ТОПОЛОГІЯ ЕКРАНИХ СТРУМІВ В СИЛОВИХ 3-ФАЗНИХ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЯХ

Розглянуто фізичні причини струмів в екранах силових 3-фазних кабельних ліній при двосторонньому заземленні екранів. На основі теорії електромагнітного поля запропонована уточнена методика розрахунку «поздовжніх» струмів в екранах кабельних ліній площинного прокладання і прокладеної «трикутником».

**Ключові слова:** силова 3-фазна кабельна лінія, кабельна лінія площинного прокладання, кабельна лінія прокладена «трикутником», електромагнітний екран, «поздовжні» струми.

S. G. LOMOV

## TOPOLOGY OF SHIELD CURRENTS IN POWER 3-PHASE CABLE LINE

The physical causes of currents in the shields of the power 3-phase cable lines with two-sided grounding of the shields are considered. Based on the theory of electromagnetic fields, an improved methodology for calculation «longitudinal» currents in shields of flat cable line and cable line laid by «triangle» is proposed.

**Keywords:** power 3-phase cable line, flat lay cable line, cable line laid by «triangle», electromagnetic shield, «longitudinal» currents.

**Введение** Основными характеристиками силовых кабельных линий (КЛ) являются мощность такой линии и удельный расход активных материалов. И хотя мощность современных КЛ подошла к гигаваттной отметке, реальные плотности рабочих токов в эксплуатации зачастую не превышают 1 А/мм<sup>2</sup> даже для медных жил. Такое положение дел для современного энергетического оборудования ни с технической ни с экономической точек зрения не должно признаваться нормальным.

Ограничивает мощность КЛ теплоотвод от кабелей этой линии. При этом основными являются два фактора. Прежде всего, это тепловые сопротивления изоляции кабеля и грунта, причем, последнее является преобладающим и весьма нестабильным. Вторым фактором являются тепловые потери в медно-проволочном электромагнитном экране (ЭМЭ). Эти потери играют роль «теплового затвора» на пути отвода теплового потока от токопроводящих жил КЛ. Очевидно, что правильная оценка и уменьшение этих потерь представляют актуальную задачу.

**Цель работы:** Целью данной статьи является рассмотрение с позиций теории электромагнитного поля механизма возникновения э.д.с и «продольных» токов при двустороннем заземлении ЭМЭ силовых трехфазных КЛ, как плоскостной укладки, так и проложенных «треугольником», и их количественная

оценка с целью уточнения некоторых общепринятых в отраслевой литературе подходов к расчету этих токов.

**Материалы исследования:** Потери в ЭМЭ рассматриваемых КЛ вызываются так называемыми «продольными» токами и вихревыми токами, физические причины возникновения которых различны. Механизм возникновения потерь от вихревых токов и их количественный анализ для сплошных ЭМЭ (оболочек) приводятся в фундаментальной литературе по технической электродинамике, например в [2].

В данной статье рассмотрены механизм возникновения и количественная оценка только «продольных» токов для кабельных линий плоскостной укладки и проложенных «треугольником». При плоскостной укладке межосевое расстояние между кабелями КЛ составляет 0,16 м, а в при прокладке «треугольником» кабели соприкасаются своими внешними оболочками.

**а) расчет «продольных» токов в ЭМЭ КЛ плоскостной укладки.**

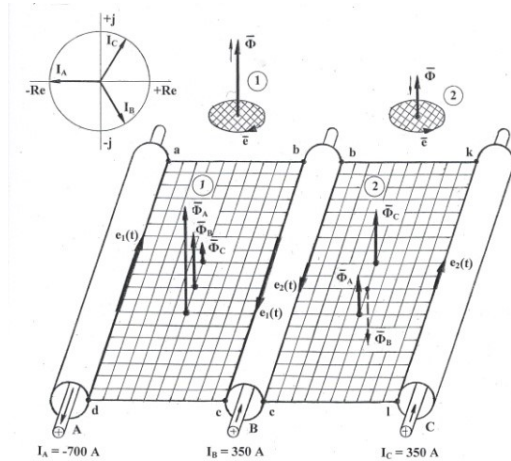


Рисунок 1 – Магнитное потокоцепление в КЛ плоскостной укладки

Замкнутые между собой ЭМЭ на концах КЛ образуют контуры 1 и 2 (рис.1), в которых в соответствии с законом электромагнитной индукции магнитные составляющие электромагнитных волн (магнитные потоки  $\Phi_A(t)$ ,  $\Phi_B(t)$ ,  $\Phi_C(t)$ ), вызванные фазными токами  $I_A(t)$ ,  $I_B(t)$  и  $I_C(t)$ , создают э.д.с.  $e_1(t)$  и  $e_2(t)$ . На рис.1 для определенного момента поворота симметричной трехфазной системы токов  $I_A(t_i)$ ,  $I_B(t_i)$  и  $I_C(t_i)$  показаны действительные действующие значения э.д.с.  $e_1(t_i)$  и  $e_2(t_i)$  в контурах 1 и 2 и действительные максимальные значения магнитных потоков  $\Phi_A(t_i)$ ,  $\Phi_B(t_i)$  и  $\Phi_C(t_i)$ . Направление э.д.с. в контурах 1 и 2 представляет собой левовинтовую или правовинтовую систему и определяется в соответствии с динамикой изменения суммарного значения магнитных потоков в данных контурах [9]. Для расчетов необходимо задаться начальным моментом и системой направлений составляющих магнитных потоков через контуры 1 и 2 в соответствии с принятым расположением фаз в КЛ (рис.1). Как это обычно принято, в начальный момент вектор тока фазы А совпадает с действительной осью при вращении симметричной трехфазной системы токов против движения часовой стрелки, то есть мгновенные действительные значения фазных токов в КЛ определяются

$$\begin{aligned} i_A &= I \cdot \cos \omega t \\ i_B &= I \cdot \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ i_C &= I \cdot \cos(\omega t + 4\pi/3) \end{aligned} \quad (1)$$

За положительное направление магнитных потоков, пересекающих плоскости контуров 1 и 2, принято направление concentрических силовых линий этих потоков, создающих с вызвавшими их токами в жилах КЛ, правовинтовую систему. Мгновенное действительное максимальное значение

магнитного потока  $\Phi_A^1(t)$ , вызванного током  $i_A(t)$  в фазе А и пересекающего плоскость контура 1, на один метр длины КЛ определяется как

$$\begin{aligned} \Phi_A^1(t) &= \int_{r_3}^{3r_3+ab} B_A^1(t, r) dr = \int_{r_3}^{3r_3+ab} \mu_0 H_A^1(t, r) dr = \\ &= \frac{\mu_0 \sqrt{2} I \cos \omega t}{2\pi} \int_{r_3}^{3r_3+ab} \frac{1}{r} dr = A_1 \cos \omega t, \end{aligned} \quad (2)$$

где:  $r_3$  - внешний радиус ЭМЭ, м;

$$A_1 = 2\sqrt{2} \cdot 10^{-7} I \cdot \ln \frac{S + r_3}{r_3}, \frac{B\sigma}{\text{м}}; S = ab + 2r_3$$

Аналогично определяется мгновенное действительное максимальное значение потока  $\Phi_A^2(t)$  от тока  $i_A(t)$  в фазе А, пересекающего плоскость контура 2, на один метр длины КЛ.

$$\Phi_A^2(t) = B_1 \cos \omega t, \text{ Вб/м}, \quad (3)$$

где:  $B_1 = 2 \cdot 2^{0.5} \cdot 10^{-7} \cdot I \cdot \ln[(2S + r_3)/(S + r_3)]$

Мгновенные действительные максимальные значения суммарных магнитных потоков, связанных с контурами 1 и 2, определяются как

$$\begin{aligned} \sum \Phi^1(t) &= A_1 \cos \omega t - A_1 \cos(\omega t + 2\pi/3) - \\ &- B_1 \cos(\omega t + 4\pi/3), \text{ Вб/м} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \sum \Phi^2(t) &= B_1 \cos \omega t + A_1 \cos(\omega t + 2\pi/3) - \\ &- A_1 \cos(\omega t + 4\pi/3), \text{ Вб/м} \end{aligned} \quad (5)$$

По закону электромагнитной индукции в контурах 1 и 2 наводятся э.д.с.  $e_1(t)$  и  $e_2(t)$ , которые являются основной причиной протекания «продольных» токов в ЭМЭ рассматриваемой топологии КЛ. Анализируя закон электромагнитной индукции (экспериментальный закон Фарадея)  $e = -\partial\Phi/\partial t$  и его математическое обобщение – второе уравнение Максвелла, сформулированное в дифференциальной форме как  $\text{rot} \mathbf{E} = -\partial\mathbf{B}/\partial t$  можно сделать вывод, что при синусоидальном изменении суммарных магнитных потоков  $\Sigma\Phi^1(t)$  и  $\Sigma\Phi^2(t)$  через контуры 1 и 2 мгновенные значения э.д.с.  $e_1(t)$  и  $e_2(t)$  также представляют собой синусоиды, опережающие соответствующие (вызвавшие их) суммарные магнитные потоки на угол  $\pi/2$ . Величины этих э.д.с. определяются следующим образом [1]. В общем случае при заданной форме кривой  $\Phi = f(t)$  изменения потокоцепления с контуром соответствующую кривую индуктированной в контуре э.д.с.  $e = -\partial\Phi/\partial t$  можно получить дифференцируя кривую

потокосцепления. При введении понятия о коэффициенте формы  $k_\Phi$  кривой потокосцепления получается весьма важное выражение для действующего значения э.д.с., индуцируемой в контуре при периодическом изменении потокосцепления с контуром. Обозначив величины максимального и минимального потокосцепления через  $\Phi_{\max}$  и  $\Phi_{\min}$  для среднего значения индуцированной э.д.с.  $E_{\text{ср}}$  имеем

$$E_{\text{ср}} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} e \cdot dt = \int_0^{T/2} \left( -\frac{d\Phi}{dt} \right) dt = -\frac{2}{T} \int_{\Phi_{\min}}^{\Phi_{\max}} d\Phi = 2f(\Phi_{\max} - \Phi_{\min}), \quad \frac{B}{M} \quad (6)$$

Так как среднее значение вычисляется за положительную полуволну, то есть от  $\Phi = \Phi_{\max}$ , когда  $e(t)$  возрастая проходит через ноль до  $\Phi = \Phi_{\min}$ . Если кривая магнитного потокосцепления симметрична и  $\Phi_{\min} = -\Phi_{\max}$ , то для действующего значения  $E$  э.д.с.  $e(t)$  получается  $E = k_\Phi \cdot E_{\text{ср}}$ . Для синусоиды  $k_\Phi = 1,11$ . Таким образом, при синусоидальном изменении потокосцепления  $\Phi = f(t)$  для одновиткового контура получаем

$$E = 4fk_\Phi \Phi_{\max} = 4,44f\Phi_{\max}, \quad \frac{B}{M} \quad (7)$$

Учитывая в нашем случае, что (7) дает действительное действующее значение индуцированной в контуре э.д.с., можно записать формулы для расчета мгновенных действительных действующих значений э.д.с.  $e_1(t)$  и  $e_2(t)$  в контурах 1 и 2 (рис1).

В дальнейшем во всех расчетных формулах под значениями э.д.с.  $e(t)$  и токов  $i(t)$  понимаются действительные действующие значения этих величин.

Таким образом, э.д.с., индуцируемые в контурах 1 и 2, определяются как

$$\begin{aligned} e_1(t) &= 2ACos(\omega t + \pi/2) - \\ &\quad - 2ACos(\omega t + 7\pi/6), \quad \frac{B}{M} \quad (8) \\ e_2(t) &= 2BCos(\omega t + \pi/2) + \\ &\quad + 2ACos(\omega t + 7\pi/6) - \\ &\quad - 2ACos(\omega t + 11\pi/6), \quad \frac{B}{M} \quad (9) \end{aligned}$$

$$A = 5,24 \cdot 10^{-7} \cdot f \cdot \ln \frac{S+r_3}{r_3}, \quad \frac{B}{M} \quad (10)$$

$$B = 5,24 \cdot 10^{-7} \cdot f \cdot \ln \frac{2S+r_3}{S+r_3}, \quad \frac{B}{M} \quad (11)$$

Зная величины э.д.с. в контурах 1 и 2 можно получить формулы для расчета мгновенных действительных действующих значений  $e_A(t)$ ,  $e_B(t)$  и  $e_C(t)$ , наведенных в электромагнитных экранах каждого кабеля КЛ на один метр длины ЭМЭ. Эти формулы получены при учете следующих физических соображений:

- направление э.д.с.  $e_C(t)$  противоположно направлению э.д.с.  $e_A(t)$  при одинаковых направлениях э.д.с.  $e_1(t)$  и  $e_2(t)$  в контурах 1 и 2;

- в ЭМЭ среднего кабеля КЛ э.д.с.  $e_B(t)$  равна алгебраической полуразности значений, полученных по (8,9);

- э.д.с.  $e_A(t)$  и  $e_C(t)$  на один метр длины ЭМЭ крайних кабелей в КЛ равны половине значений  $e_1(t)$  и  $e_2(t)$ .

После преобразований и упрощений получаем значения э.д.с., наведенные на один метр длины ЭМЭ в каждом кабеле КЛ.

$$\begin{aligned} e_A(t) &= 0,5e_1(t) = ACos(\omega t + \pi/2) - \\ &\quad - ACos(\omega t + 7\pi/6) - \\ &\quad - BCos(\omega t + 11\pi/6), \quad \frac{B}{M} \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_B(t) &= [e_2(t) - e_1(t)]/2 = \\ &= (B-A) \cdot Cos(\omega t + \pi/2) + \\ &\quad + 2ACos(\omega t + 7\pi/6) + \\ &\quad + (B-A) \cdot Cos(\omega t + 11\pi/6), \quad \frac{B}{M} \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_C(t) &= -0,5e_2(t) = ACos(\omega t + 11\pi/6) - \\ &\quad - BCos(\omega t + \pi/2) - \\ &\quad - ACos(\omega t + 7\pi/6), \quad \frac{B}{M} \quad (14) \end{aligned}$$

Основным допущением при расчете «продольных» токов в ЭМЭ является представление КЛ плоскостной укладки, как линии электрически симметричной.

При этом допущении дальнейшие расчеты токов в ЭМЭ мы можем вести не с различными векторами полных фазных проводимостей  $Y_A$ ,  $Y_B$ , и  $Y_C$ , а с одинаковым для всех фаз в симметричной КЛ модулем комплексной полной проводимости  $|Y|$ . Учитывая (15-17) и принятое допущение, принимается, что активные сопротивления каждого из ЭМЭ в КЛ равны  $R_3$ , Ом/м, а реактивные (индуктивные) сопротивления  $x_3$  также равны и определяются как

$$x_3 = \omega(L - M_{AB}), \quad \frac{\text{Ом}}{\text{м}} \quad (15)$$

$$L = 2 \cdot 10^{-7} [\ln(2/r_3) - 1], \quad \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \quad (16)$$

$$M_{AB} = 2 \cdot 10^{-7} [\ln(2/S) - 1], \quad \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \quad (17)$$

$r_3$  – внешний радиус ЭМЭ, м;

$S$  – межосевое расстояние КЛ, м.

При принятых равенствах во всех экранах  $R_3$  и  $x_3$  одинаковым является и угол  $\phi$ , на который в каждом ЭМЭ «продольный» ток отстает от вызвавшей его э.д.с. Этот угол определяется как  $\phi = \arctg(x_3 / R_3)$ . Принятые допущения незначительно изменяют амплитудные и фазовые значения «продольных» токов и э.д.с. в экранах КЛ, но намного упрощают нижеприведенные расчеты «продольных» токов.

По предложенной упрощенной расчетной схеме определение для нашей КЛ мгновенных действительных действующих значений «продольных» токов представляет собой простую задачу, решаемую методом

наложения с помощью основных законов Кирхгофа в виде

$$i_A(t) = e_A(t) \cdot |Y| - 0,5e_B(t) \cdot |Y| - 0,5e_C(t) \cdot |Y|, \quad A \quad (18)$$

$$i_B(t) = e_B(t) \cdot |Y| - 0,5e_A(t) \cdot |Y| - 0,5e_C(t) \cdot |Y|, \quad A \quad (19)$$

$$i_C(t) = e_C(t) \cdot |Y| - 0,5e_A(t) \cdot |Y| - 0,5e_B(t) \cdot |Y|, \quad A \quad (20)$$

$$Z = R_{\Sigma} - jx_{\Sigma}, \quad \text{Ом/м}$$

$$\sum Z = Z + Z/2, \quad \text{Ом/м}$$

$$\bar{Y} = 1/\sum \bar{Z}, \quad \text{См} \cdot \text{м}$$

$|Y| = 1/[\text{Re}Y^2 + (\text{Im}Y)^2]^{0,5}$ , См·м  
 $R_{\Sigma}$  для ЭМЭ сечением 120 мм<sup>2</sup> при 70°C составляет  $18 \cdot 10^{-5}$  Ом/м. С учетом (12-14) после преобразования и упрощения получаем мгновенные действительные действующие значения «продольных» токов в ЭМЭ каждой фазы КЛ плоскостной укладки как

$$i_A(t) = |Y| \cdot ((1,5A \cdot \cos(\omega t + \pi/2 - \varphi) - 1,5A \cdot \cos(\omega t + 7\pi/6 - \varphi) - 1,5B \cdot \cos(\omega t + 11\pi/6 - \varphi)), \quad A \quad (21)$$

$$i_B(t) = |Y| \cdot (((3A \cdot \cos(\omega t + 7\pi/6 - \varphi) + (1,5B - 1,5A) \cdot (\cos \omega t + \pi/2 - \varphi) + \cos(\omega t + 11\pi/6 - \varphi))), \quad A \quad (22)$$

$$i_C(t) = |Y| \cdot ((1,5A \cdot \cos(\omega t + 11\pi/6 - \varphi) - 1,5A \cdot \cos(\omega t + 7\pi/6 - \varphi) - 1,5B \cdot \cos(\omega t + \pi/2 - \varphi)), \quad A \quad (23)$$

**б) расчет «продольных» токов в ЭМЭ КЛ, проложенной «треугольником», при расположении кабелей встык внешними оболочками.**

Такая КЛ является электрически симметричной, что позволяет проводить расчеты только для одного ЭМЭ любой фазы. В экранах остальных фаз значения э.д.с. и токов будут равны по величине и сдвинуты на 120 электрических градусов.

Необходимо учитывать, что геометрия магнитного потокоосцепления внешних магнитных полей с ЭМЭ кабеля конкретной фазы трехфазной КЛ, проложенной «треугольником», сложнее, чем для КЛ плоскостной укладки из-за эффекта «самоэкранирования» этих полей токопроводящими жилами соседних фаз. Расчет такого экранирования круглыми ТПЖ достаточно сложен и при его расчете было сделано допущение, что ТПЖ кабеля имеет форму плоской жилы такого же сечения, что и круглая ТПЖ, с шириной, равной её диаметру. С расчетом экранирования внешнего магнитного поля такой плоской жилой можно познакомиться в [2]. Для рассматриваемого сечения ТПЖ кабеля расчет показал, что приближенно можно считать, что

внешнее магнитное поле от соседних ТПЖ кабеля не проходит в ЭМЭ через рассматриваемую ТПЖ.

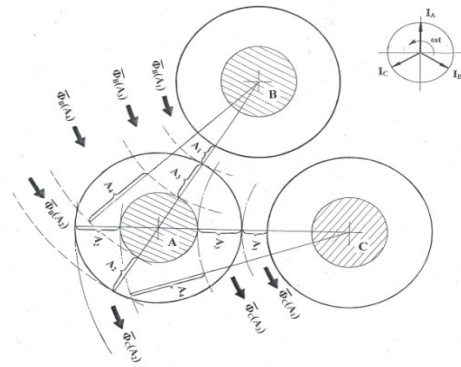


Рисунок 2 – Магнитное потокоосцепление в КЛ, проложенной «треугольником»

На рис. 2 показана геометрия магнитного потокоосцепления с ЭМЭ кабеля фазы А для начального момента времени (действительное значение рабочего тока в фазе А имеет максимальное значение). Учитывая вышеприведенные выводы, получаем для данного типа КЛ следующие формулы для расчета мгновенных действительных действующих значений э.д.с. в ЭМЭ всех фаз

$$e_A(t) = I \cdot ((C_1 \cdot \cos(\omega t + 7\pi/6) + C_2 \cdot \cos(\omega t + 11\pi/6)), \quad B/м \quad (24)$$

$$e_B(t) = I \cdot ((C_1 \cdot \cos(\omega t + 11\pi/6) + C_2 \cdot \cos(\omega t + \pi/2)), \quad B/м \quad (25)$$

$$e_C(t) = I \cdot ((C_1 \cdot \cos(\omega t + \pi/2) + C_2 \cdot \cos(\omega t + 7\pi/6)), \quad B/м \quad (26)$$

$$C_1 = 2A_2 + 2A_3 + A_4 - A_1, \quad B/м \quad (27)$$

$$C_2 = A_1 + 2A_2 + 2A_3, \quad B/м \quad (28)$$

$$A_1 = k \cdot f \cdot \ln \frac{r_{\Sigma} + 2\Delta_2}{r_{\Sigma}}, \quad B/м \quad (29)$$

$$A_2 = k \cdot f \cdot \ln \frac{3R_K - \Delta_2}{3R_K - \Delta_2 - \Delta_1}, \quad B/м \quad (30)$$

$$A_3 = k \cdot f \cdot \ln \frac{r_{\Sigma} + \Delta_2 + \Delta_1}{r_{\Sigma}}, \quad B/м \quad (31)$$

$$A_4 = k \cdot f \cdot \ln \frac{3R_K - \Delta_2 - \Delta_1}{R_K + \Delta_2 + \Delta_1}, \quad B/м \quad (32)$$

$$\text{где: } k = 5,24 \cdot 10^{-7}, \quad B/А \cdot м \cdot Гц$$

$R_K$  – внешний радиус кабеля, м;  $\Delta_1$  – толщина основной электрической изоляции кабеля с учетом толщин ЭМЭ, двух слоев электрических полупроводящих экранов, слоя водонабухающих волокнистых материалов и слоя алюмополимерной ленты (если применяется), м;  $\Delta_2$  – толщина внешней защитной оболочки кабеля, м.

Расчетная схема и методика расчета «продольных» токов в экранах КЛ, проложенной

«треугольником», аналогичны тем, что приняты при расчетах таких токов в КЛ плоскостной укладки с учетом того, что при расчете модуля полной проводимости  $|Y|$  ЭМЭ используется величина межжелезного расстояния  $S$ , равная 0,08 м, а не величина  $S$ , принятая в расчетах для КЛ плоскостной укладки  $S=0,16$  м.

Таким образом, мгновенные действительные действующие значения «продольных» токов, протекающих в электромагнитных экранах каждой из фаз КЛ, проложенной «треугольником», определяются как

$$i_A = I \cdot |Y| \cdot (((C_1 - C_2)/2) \cos(\omega t + 7\pi/6) + (C_2 - C_1)/2 \cos(\omega t + 11\pi/6) - ((C_1 + C_2)/2) \cos(\omega t + \pi/2)), A \quad (33)$$

$$i_B(t) = I \cdot |Y| \cdot (((C_1 - C_2)/2) \cos(\omega t + 11\pi/6) + (C_2 - C_1)/2 \cos(\omega t + \pi/2) - ((C_1 + C_2)/2) \cos(\omega t + 7\pi/6)), A \quad (34)$$

$$i_C(t) = I \cdot |Y| \cdot (((C_1 - C_2)/2) \cos(\omega t + \pi/2) + (C_2 - C_1)/2 \cos(\omega t + 7\pi/6) - ((C_1 + C_2)/2) \cos(\omega t + 11\pi/6)), A \quad (35)$$

Необходимо отметить, что расчет этих токов более точен в сравнении с аналогичным расчетом для КЛ плоскостной укладки, так как КЛ, проложенная «треугольником», является электрически симметричной и вследствие этого активные и индуктивные сопротивления экранов всех кабелей КЛ соответственно одинаковы.

Для расчетов был принят кабель марки АПвЭГАП-1 × 630/120-64/110 при действующем значении фазного рабочего тока 700 А с двухсторонним соединением и заземлением электромагнитных экранов в КЛ.

Косвенной проверкой формул (12-14, 21-26, 32-35) является то, что в любой момент времени суммы э.д.с.  $e(t)$  и «продольных» токов  $i(t)$  в ЭМЭ всех трех фаз КЛ равны нулю, что и происходит при выполнении полного цикла транспозиции экранов. Анализ этих формул позволяет получить величины действующих э.д.с.  $E_{\Sigma}$  и «продольных» токов  $I_{\Sigma}$  в ЭМЭ двух типов КЛ.

Для среднего кабеля КЛ плоскостной укладки действующие величины наведенной э.д.с.  $E_{\Sigma m}$  и «продольного» тока  $I_{\Sigma m}$  при двухстороннем соединении экранов между собой соответственно равны

$$E_{\Sigma m} = k_1 \cdot I \cdot (3 \cdot \ln((S + r_{\Sigma})/r_{\Sigma}) - \ln((2S + r_{\Sigma})/(S - r_{\Sigma}))), B/m \quad (36)$$

$$I_{\Sigma m} = k_1 \cdot I \cdot |Y| \cdot (4,5 \cdot \ln((S + r_{\Sigma})/r_{\Sigma}) - 1,5 \cdot \ln((2S + r_{\Sigma})/(S - r_{\Sigma}))), A \quad (37)$$

$$\text{где: } k_1 = 2,62 \cdot 10^{-5}, B/A \cdot m$$

Для крайних кабелей КЛ плоскостной укладки эти величины равны

$$E_{\Sigma} = k_1 \cdot I \cdot (1,71 \cdot \ln((S + r_{\Sigma})/r_{\Sigma}) + 0,172 \cdot \ln((2S + r_{\Sigma})/(S - r_{\Sigma}))), B/m \quad (38)$$

$$I_{\Sigma} = k_1 \cdot I \cdot |Y| \cdot (2,58 \cdot \ln((S + r_{\Sigma})/r_{\Sigma}) + 0,27 \cdot \ln((2S + r_{\Sigma})/(S - r_{\Sigma}))), A \quad (39)$$

Для КЛ, проложенной «треугольником», действующие величины наведенной э.д.с.  $E_{\Sigma}$  и «продольного» тока  $I_{\Sigma}$  одинаковы для всех ЭМЭ кабелей КЛ и соответственно равны

$$E_{\Sigma} = k_1 I (2 \ln((3R_K - \Delta_{\Sigma})/(3R_K - \Delta_{\Sigma})) + 2 \ln((r_{\Sigma} + \Delta_{\Sigma})/r_{\Sigma})) - k_1 I (0,15 \ln((r_{\Sigma} + 2\Delta_{\Sigma})/r_{\Sigma}) - 0,6 \ln((3R_K - \Delta_{\Sigma})/(R_K + \Delta_{\Sigma}))), B/m \quad (40)$$

где:  $\Delta_{\Sigma} = \Delta_1 + \Delta_2, M$

$$I_{\Sigma} = k_1 I |Y| (3 \ln((3R_K - \Delta_{\Sigma})/(3R_K - \Delta_{\Sigma})) + 3 \ln((r_{\Sigma} + \Delta_{\Sigma})/r_{\Sigma})) + k_1 I |Y| (0,5 \ln((r_{\Sigma} + 2\Delta_{\Sigma})/r_{\Sigma}) + 0,5 \ln((3R_K - \Delta_{\Sigma})/(R_K + \Delta_{\Sigma}))), A \quad (41)$$

На рисунке 3а,б представлены векторные диаграммы действующих значений э.д.с. и «продольных» токов в электромагнитных экранах двух рассмотренных типов КЛ.

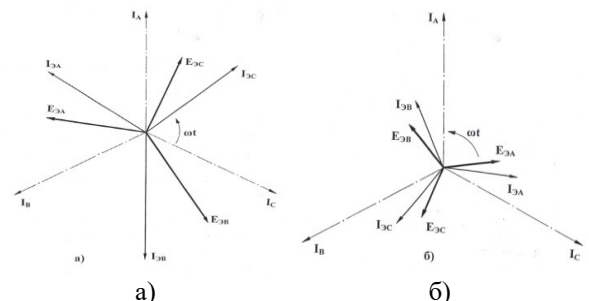


Рисунок 3 – Векторные диаграммы э.д.с. и  $E_{\Sigma}$  «продольных» токов  $I_{\Sigma}$  в ЭМЭ КЛ:  
а – КЛ плоскостной укладки,  
б – КЛ, проложенная «треугольником»

**Выводы:** В качестве вывода для данной статьи в таблице приведены значения э.д.с. и токов в ЭМЭ двух типов КЛ, которые рассчитаны по предложенной в статье методике и по методикам, предложенным в нескольких авторитетных нормативных и литературных источниках. Отличие полученных результатов по мнению автора подтверждает актуальность статьи и практическую ценность представленных результатов.

Таблица 1 – Э.д.с и токи в экране кабеля

Лит.	Е <sub>э</sub> и I <sub>э</sub> в ЭМЭ кабеля АПвЭГДП-1×630/120-64/100 при действующей величине фазного тока I=700 А					
	КЛ плоскостной укладки при S=0,16 м				КЛ, пролож. «Δ» при S=0,08 м	
	Е <sub>э</sub> , мВ/м		I <sub>э</sub> , А		Е <sub>э</sub> , мВ/м	I <sub>э</sub> , А
	средн. кабель	крайн. кабель	средн. кабель	крайн. кабель		
[3]	76		385		36	385
[4]	118		нет расчета		83	н/р
[5]	67		365	395-430	36	328
[6]	1340	1940	нет расчета		364	20
Предл.	74,5	58	370	284	31	163

## Список литературы

1. Нейман Л.Р., Калантаров П.Л. Теоретические основы электротехники, в 3-х томах. Теория электромагнитного поля. –М.: ГЭИ, 1959, 232 с.
2. Туровский Я. Техническая электродинамика. Пер. с польского.-М.: «Энергия», 1974, 488 с.
3. Силовые кабели. Методика расчета устройств заземления экранов, защиты от перенапряжений изоляции силовых кабелей на напряжение 110 – 500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Стандарт организации «ФСК ЕЭС», Россия, СТО 56947007 29. 060. 20. 103 - 2011
4. Руководящий технический материал по сооружению, испытаниям и эксплуатации кабельных линий с использованием кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 64/110 кВ. Под ред. акад. НАН Украины А.К. Шидловского и к.т.н. В.М. Золотарева. Хариков, «Майдан», 2006, 62 с.
5. Основы кабельной техники. Под ред. Привезенцева В.А. –М.: «Энергия», 1975, 472 с.
6. Белорусов Н.И. Электрические кабели и провода. –М.: «Энергия», 1971, 512 с.

7. Основы кабельной техники. Под ред. И.Б. Пешкова. –М.: Издат. центр «Академия», 2006, 432 с.
8. Ларина Э.Т. Силовые кабели и кабельные линии. –М.: Энергоатомиздат, 1984, 368 с.
9. Боев В.М. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. Учебное пособие. Киев, ИСЮ, 1994, 274 с.

## References (transliterated)

1. Neyman L.R., Kalantarov P.L. Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki, v 3-kh tomakh. Teoriya elektromagnitnogo polya. - M.: GEI, 1959, 232
2. Turovskiy A. Tekhnicheskaya elektrodinamika. Per. s pol'skogo. - M.: "Energiya", 1974, 488 s.
3. Silovyye kabeli. Metodika rascheta ustroystv zazemleniya ekranov, zashchity ot perenapryazheniy izolyatsii silovyykh kabeley na napryazheniye 110 - 500 kV s izolyatsiyey iz sshitogo polietilena. Standart organizatsii "FSK YEES", Rossiya, STO 56947007 29. 060. 20. 103 - 2011.
4. Rukovodyashchiy tekhnicheskyy material po sooruzheniyu, ispytaniyam i ekspluatatsii kabel'nykh liniy s ispol'zovaniyem kabeley s izolyatsiyey iz sshitogo polietilena na napryazheniye 64/110 kV. Pod red. akad. NAN Ukrainy A.K. Shidlovskogo i k.t.n. V.M. Zolotareva. Khar'kov, "Maydan", 2006, 62s
5. Osnovy kabel'noy tekhniki. Pod red. Privezentseva V.A. - M.: "Energiya", 1975, 472 s.
6. Belorussov N.I. Elektricheskiye kabeli i provoda. - M.: "Energiya", 1971, 512 s.
7. Osnovy kabel'noy tekhniki. Pod red. I.B. Peshkova. - M.: Izdat. tsentr "Akademiya", 2006, 432s.
8. Larina E.T. Silovyye kabeli i kabel'nyye linii. -M.: Energoatomizdat, 1984, 368 s.
9. Boyev V.M. Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. Elektromagnitnoye pole. Uchebnoye posobiye. Kiyev, ISIO, 1994, 274 s.

Надійшло (received) 09.11.2019

## Сведения об авторах /Відомості про авторів/ About the Authors

**Ломов Сергей Георгиевич (Ломов Сергій Георгійович, Lomov Serhii)** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры «Электроизоляционная и кабельная техника», e-mail: [segelom47@gmail.ua](mailto:segelom47@gmail.ua), [sgl47@rambler.ru](mailto:sgl47@rambler.ru)